

DOI: 10.11779/CJGE2020S1002

用于土体宏微观力学特性测试的微型三轴仪研制

蒋明镜^{1, 2, 3, 4}, 李光帅^{1, 2}, 曹培³, 吴晓峰³

(1. 天津大学建筑工程学院土木工程系, 天津 300350; 2. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350; 3. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 4. 中国地震局地震工程综合模拟与城乡抗震韧性重点实验室(天津大学), 天津 300350)

摘要: 探求土体宏观力学性质背后的微细观机理, 需要观测土体的微细观力学行为, 为此基于常规三轴仪研制了适用于工业 CT (computerized tomography) 系统扫描的微型三轴仪, 该设备包含加载装置和采集控制系统两部分, 主要特点是体积小, 重量轻, 能够放入 CT 设备中进行旋转扫描, 试样扫描清晰, 能够获取土体三轴应力状态下土体的微观结构和力学信息, 试验数据可靠, 兼容性强, 不影响现有 CT 的功能且无需改装 CT, 操作方便, 经济合理。利用丰浦砂干砂样与常规三轴仪进行对比试验, 微型三轴仪得到的应力应变关系与常规三轴试验基本一致, 得到的内摩擦角误差较小, 验证了该微型三轴仪的可靠性。

关键词: 微型三轴仪; CT 扫描; 无损检测; 宏微观力学特性

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S1-0006-05

作者简介: 蒋明镜(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事天然结构性黏土、砂土、非饱和土、太空土和深海能源土宏观微观试验、本构模型和数值分析研究。E-mail: mingjing.jiang@tju.edu.cn。

Development of miniature triaxial apparatus for testing of macro- and micro-mechanical behaviors of soils

JIANG Ming-jing^{1, 2, 3, 4}, LI Guang-shuai^{1, 2}, CAO Pei³, WU Xiao-feng³

(1. Department of Civil Engineering, School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Key Laboratory of Earthquake Engineering Simulation and Seismic Resilience of China Earthquake Administration (Tianjin University), Tianjin 300350, China)

Abstract: In order to explore the microscopic mechanisms associated with the macroscopic mechanical properties of soil, it is necessary to investigate the microscopic mechanical behaviors of soil. Based on the conventional triaxial apparatus, a miniature triaxial apparatus suitable for industrial CT system scanning is developed, which includes loading device and acquisition control system. The main features are as follows. The loading device can be put into CT equipment for rotary scanning because of small size and light weight. The specimen can be scanned clearly to obtain the microstructure and mechanical information of soil under triaxial stress. The reliable test data can be obtained. The miniature triaxial apparatus has strong compatibility, which does not affect the function of CT and does not also refit CT. It also has the advantage of convenient operation and low price. The contrast tests for the dry Toyoura sand samples are carried out by the miniature triaxial apparatus and conventional triaxial apparatus. The results show the stress-strain relationship and angle of internal friction obtained from miniature triaxial apparatus are in agreement with that obtained from the conventional triaxial apparatus. There is little difference on angles of internal friction obtained by two apparatus. Thus the reliability of the miniature triaxial apparatus is verified.

Key words: miniature triaxial apparatus; CT scanning; non-destructive detection; macro- and micro-mechanical behavior

0 引言

基于连续介质理论和唯象的常规土力学在描述岩土材料非连续性、大变形和破坏等复杂特性方面存在缺陷, 笔者^[1]在第 22 讲黄文熙讲座中提出宏微观土力学的概念, 为现代土力学研究开启了新视野, 从本质上探求岩土材料复杂宏观特性的微细观机理, 首先需

要探知土体的微细观特性, 如土体的微观结构^[2]、粒间接触响应^[3]、颗粒转动^[4]、颗粒破碎^[5], 应变局部化^[6]等, 其主要研究方法包括微观试验方法和离散单元法。

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (51890911); 国家自然科学基金重点项目 (51639008)

收稿日期: 2020-06-05

而离散单元法等数值模拟方法也需要室内试验结果作为建立模型的依据和验证手段。因此, 需要研发相关试验设备, 为探求土体宏观力学性质背后的微观机理提供试验基础。

将传统的三轴试验设备与 CT 扫描设备相结合, 是获取岩土材料微细观结构及力学信息的有效方法。许多学者针对不同岩土材料通过研制或使用相应的试验设备结合 CT 扫描进行了微细观研究。王登科等^[7]采用美国通用电气公司生产的煤岩 CT 扫描系统研究煤体裂隙动态演化, 该系统可进行非受载、单轴加载、三轴加载条件下煤岩材料样品的三维细观结构扫描。葛修润等^[8]研制出与 CT 机配套的用于测试煤岩的三轴加载设备, 可进行煤岩损伤扩展的动态扫描。陈正汉等^[9]将改造后的非饱和土三轴仪平放入卧式 CT 机中对试样的横断面进行扫描, 可进行多种应力路径下的三轴试验, 可观测土样的微孔隙、微裂纹, 并能追踪试验中裂隙发育成破坏面的演化过程。李小春等^[10]利用能和微焦 X 射线 CT 系统配套使用的三轴仪, 得出细观孔隙结构的变化是导致 Berea 砂岩渗透性改变的原因。庞旭卿等^[11]利用应力控制式 CT-三轴仪对黄土进行常规三轴剪切试验, 能够观测到黄土空洞区周围土颗粒的滑移。曹剑秋等^[12]利用自主研发的微型三轴仪, 研究南京粉砂三轴应力状态下的力学特性, 通过显微 CT 扫描获取试验中试样孔隙变化和颗粒间错动规律。程壮等^[13]开发了一台微型三轴试验装置, 借助于 X 射线显微 CT 及图像处理分析技术, 该装置能够实现对砂土微尺寸试样(直径为 8 mm, 高度为 16 mm)在三轴剪切条件下微观特性的无损检测。

三轴剪切试验过程中对试样进行 CT 扫描已经成为获取岩土材料宏观力学特性背后微细观信息和力学特性的重要试验手段, 为了研究土体宏微观力学特性, 笔者团队自主研制了适用于 CT 扫描的微型三轴仪, 该仪器测试可靠, 兼容性强, 操作方便, 经济合理, 能够进行岩土试样结构内部任意断面完整扫描, 实现试验过程中对试样的无损检测。

1 微型三轴仪研制和特点

本文在常规三轴试验设备的基础上, 研制出一种适用于土体宏微观特性测试的微型三轴仪, 其研制基本原则是: ①通过调研目前工业 CT 扫描设备内空间大小, 发现能够容纳的仪器尺寸有限, 常规三轴仪器无法置于其中; ②仪器选材除需要轻质和满足强度要求外, 为保证 CT 扫描清晰, 压力室宜采用透光性材料且无遮挡; ③满足常规三轴仪测试土体力学特性的基本要求, 试验结果可靠; ④要便于操作, 不宜使装

样、加载等过程复杂; ⑤不影响工业 CT 设备的其他使用功能, 不需要对 CT 设备进行改装; ⑥经济合理, 适合于广大青年科研人员开展研究。

1.1 微型三轴仪主要特点

微型三轴仪主要由加载装置和控制采集箱组成, 加载装置用以对试样施加荷载, 主要包括步进电机, 压力室及轴压、孔压传感器等, 如图 1(a)所示。加载装置高度为 40 cm, 质量约为 10 kg, 底座直径为 12 cm, 能轻便地放置于工业 CT 扫描设备内, 如图 1(b)所示, 该加载装置通过围压管路、试样顶部排水管路和数据线与外部控制采集箱相连接, 控制采集箱包括触摸屏、围压调压舱、反压调压舱及围压传感器和孔压传感器等, 如图 1(c)所示。试验时通过控制采集箱上的触摸屏及软件进行参数设置和控制加载。试验时不需要对 CT 设备进行改装, 并且不影响 CT 设备的其他检测功能, 试验结束后将主机从 CT 设备内取出即可。微型三轴仪底座由铝和不锈钢制成, 压力室由透光性好的有机玻璃制成, 其余部分主要由不锈钢制成, 压力室壁厚为 5 mm, 并且无遮挡部件, 压力室半径为 35 mm, 能够使 X 射线光源尽可能靠近试样, 既能保证微型三轴仪轻便、强度高, 而且可以保证试样扫描图像的清晰度, 如图 2 所示。微型三轴仪试样尺寸为直径 10 mm, 高度 20 mm, 根据规范^[14]可适用于粒径小于 1 mm 的土体, 这满足砂土、粉土、黏土的颗粒要求, 适用范围较广, 另外由于试样尺寸较小, 可对试样整体进行扫描。试验制样时, 操作简单, 用内径 10 mm、高度 20 mm 的环刀切取土样, 装样与常规三轴试验操作一致, 不需要额外繁琐的操作步骤和辅助工具。通过将该微型三轴仪与 CT 扫描相结合, 既能得到土样的宏观力学参量, 又能获取宏观力学性质背后的微细观结构和力学信息, 为数值仿真模拟提供试验依据。该设备属自主研制, 经济合理, 加工方便, 适合广大岩土科研人员特别是青年科研人员使用。

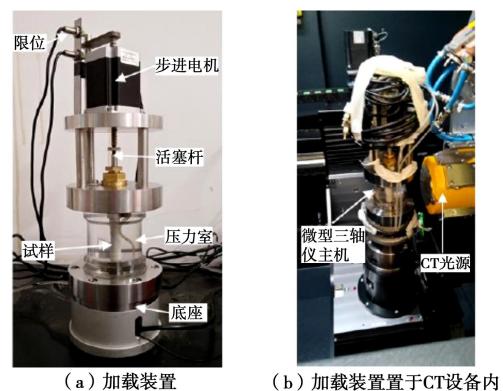




图 1 微型三轴仪

Fig. 1 Miniature triaxial apparatus

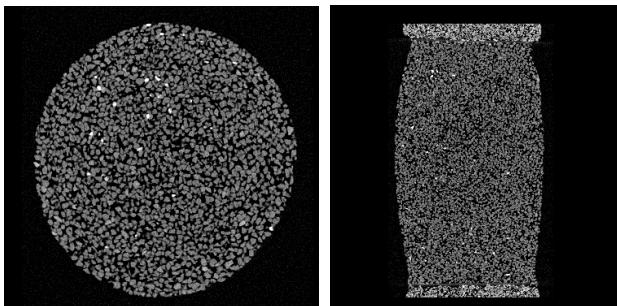


图 2 丰浦砂样 CT 扫描切片

Fig. 2 Micro-CT slice of Toyoura sand sample

1.2 轴压控制系统

轴压加载通过贯通式步进电机经竖向活塞杆和试样帽将轴向压力施加给试样，加载方式分为应变控制和应力控制，试样扫描过程中能够保持试样的应力状态或位移基本不变。轴向荷载传感器安装在试样下方的底座内，有效地消除了轴向荷载中由活塞杆与活塞螺母之间摩擦力引起的测量误差。但这会导致在围压加载时会引起轴向传感器出现压力值，因此，在试样剪切前需将围压引起的轴向荷载传感器压力值清零，采集系统所记录的即为偏应力值。贯通式步进电机通过数据线与控制采集箱连接，加载过程中实时记录轴向荷载传感器的压力值。

1.3 围压控制系统

压力室通过围压管路与控制采集箱中的围压调压舱连接，试验时首先要将压力室内注满水，通过围压调压舱对试样施加围压，围压允许的最大值为 600 kPa，围压的加压速度可以调节，当到达设定围压值时，保持围压稳定。

1.4 反压控制系统

反压控制系统是控制采集箱中的反压调压舱通过反压管路和试样顶部排水管，与试样相连，通过反压调压舱对试样施加反压，反压允许的最大值为 600 kPa。同时，该管路也为微型三轴仪的上排水管路，即试样通过上部排水将试样内的水排至反压调压舱内，

根据测得的反压调压舱体积变化，作为试样在试验过程中的排水量。

1.5 量测采集系统

量测采集系统包括控制采集箱、轴向荷载传感器、孔隙水压力传感器和数据线。轴向荷载传感器量测步进电机施加到试样上的荷载，经数据线由控制采集箱计算为应力并记录。孔压传感器通过试样下部排水管与试样连接，测得的孔隙水压力经数据线由控制采集箱记录。围压和反压传感器位于相应的调压舱内，用以反馈控制围压和反压稳定。试样的轴向位移由步进电机的丝杆行程计算而得并由控制采集箱记录。

该微型三轴仪是在常规三轴设备的基础上研制而成，满足常规三轴试验的基本功能，结合目前现有的工业 CT，通过 CT 扫描能够获取土体的微观结构和力学信息，扫描结果清晰，数据可靠，同时具备兼容性强，适应性好，操作方便，经济合理等优点，可用于岩土材料宏观力学特性的研究。

2 微型三轴仪与常规三轴仪对比试验

2.1 制样

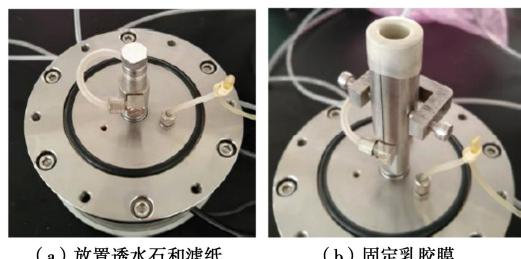
丰浦砂是日本生产的试验用标准砂，本试验采用丰浦砂制作干砂试样，其物理指标见表 1。

表 1 丰浦砂物理参数

Table 1 Physical parameters of Toyoura sand

土粒相对密度 G_s	最大孔隙比 e_{\max}	最小孔隙比 e_{\min}
2.65	0.977	0.597

根据所要求的孔隙比和试样体积称取一定质量的丰浦砂。干砂制样时，首先将透水石和滤纸放置于试样底座上，将乳胶膜套在透水石和试样底座上，用橡皮筋将乳胶膜和试样底座箍紧，用对开模将乳胶膜箍住，用夹具锁紧，将乳胶膜上端翻下套在对开模上，然后将预先称好的丰浦砂分层均匀装入乳胶膜内，在砂样顶面依次放置滤纸和透水石，确保透水石顶面与对开模顶面齐平，最后装好试样上帽，拆除对开模，制样完成，如图 3 所示。将压力室外罩轻轻放在压力室底座上，拧紧螺丝防止加固压时压力室漏水。活塞杆轻轻触碰在试样帽顶面，将电机加载杆调节至与活塞杆顶面刚好接触。



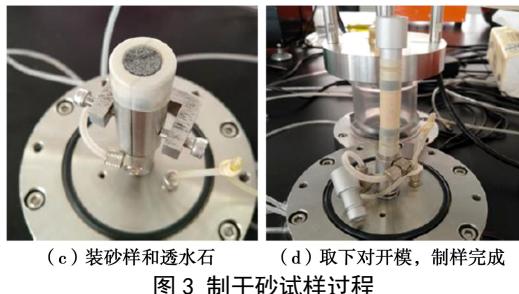


图 3 制干砂试样过程

Fig. 3 Process of making dry sand sample

2.2 试验方案

按照上述制样和加载步骤, 分别进行 100, 150, 200 kPa 围压条件下的微型三轴不固结不排水 (UU) 剪切试验。此外, 制备与微型三轴砂样相同孔隙比和相对密实度的常规三轴砂样, 即直径为 39.1 mm, 高度为 80 mm 的试样, 利用常规三轴仪分别进行 100, 150, 200 kPa 围压条件下的三轴不固结不排水剪切试验。

2.3 试验结果分析

图 4, 5 为微型三轴仪与常规三轴仪试验及得到的偏应力与轴向应变关系。由图 5 可知, 在不同围压下由微型三轴试验和常规三轴试验得到的应力与应变关系变化规律相似, 当应变较小时, 偏应力迅速增加, 随后偏应力缓慢增加, 轴向应变达到 5% 左右时出现偏应力峰值, 随着轴向应变的增加, 偏应力逐渐减小, 出现应变软化现象。在不同围压下微型三轴试验得到的峰值偏应力与常规三轴试验得到的峰值偏应力接近。另外, 通过图 4 可以看到, 微型三轴试验和常规三轴试验分别出现了角度相近的剪切带。



图 4 微型三轴仪与常规三轴仪对比试验

Fig. 4 Contrast tests between miniature triaxial apparatus and conventional triaxial apparatus

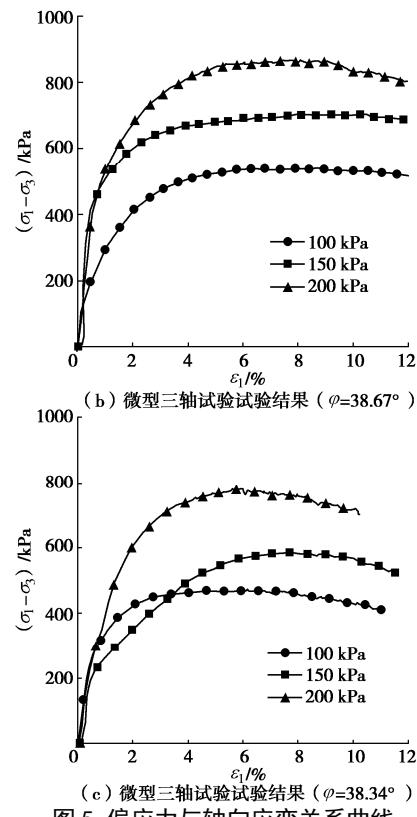
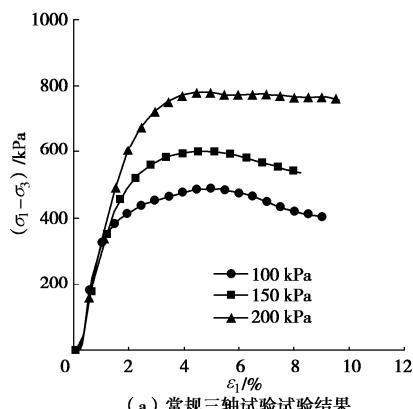


图 5 偏应力与轴向应变关系曲线

Fig. 5 Relationship between deviator stress and axial strain

微型三轴试验和常规三轴试验得出的砂样的内摩擦角如表 2 所示, 微型三轴试验得到的两组内摩擦角几乎相等, 另外, 与常规三轴试验得到的内摩擦角数值接近, 误差约为 5%, 验证了微型三轴仪的可靠性。

表 2 内摩擦角结果比较

Table 2 The comparison of the angle of internal friction

试验类型	内摩擦角 ϕ / (°)
微型三轴试验	38.67
常规三轴试验	38.34
误差	36.53
	5%

3 结论与展望

本文介绍了基于常规三轴试验设备研发的微型三轴仪, 结合 CT 扫描设备, 可用于测试土样的宏微观力学特性, 主要结论如下:

(1) 该微型三轴仪能够实现常规三轴的基本功能, 轻便易携带, 能够成功置于工业 CT 系统设备内进行扫描, 试样扫描图像清晰, 实现对土样无损检测, 数据可靠, 操作方便, 兼容性强, 经济合理。

(2) 采用丰浦砂干砂, 将微型三轴仪与常规三轴仪进行剪切试验对比, 结果表明, 微型三轴仪得到的应力应变关系曲线与常规三轴仪基本一致, 测得的力学指标误差较小, 验证了该微型三轴仪的可靠性。

另外, 还需验证该微型三轴仪对黏土的适用性, 进而用于深海土三轴试样 CT 可视化试验, 分析土体

在三轴剪切应力路径下微细观特征和演化规律, 为深海土研究提供实测数据模型。

致 谢: 感谢张家港晟泰克智能仪器有限公司对仪器的加工制作。

参考文献:

- [1] 蒋明镜. 现代土力学研究的新视野——宏微观土力学[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(2): 195 – 254. (JIANG Ming-jing. New paradigm for modern soil mechanics: Geomechanics from micro to macro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(2): 195 – 254. (in Chinese))
- [2] AMOROSI A, RAMPELLO S. An experimental investigation into the mechanical behaviour of a structured stiff clay[J]. Géotechnique, 2007, **57**(2): 153 – 166.
- [3] JIANG M J, SUN Y G, LI L Q, et al. Contact behavior of idealized granules bonded in two different interparticle distances: an experimental investigation[J]. Mechanics of Materials, 2012, **55**(14): 1 – 15.
- [4] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance[J]. Computers and Geotechnics, 2005, **32**(5): 340 – 357.
- [5] COOP M R, SORENSEN K K, FREITAS T B, et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand[J]. Géotechnique, 2004, **54**(3): 157 – 163.
- [6] WIEBICKE M, ANDO E, VIGGIANI G, et al. Measuring the evolution of contact fabric in shear bands with X-ray tomography[J]. Acta Geotechnica, 2020, **15**(1): 79 – 93.
- [7] 王登科, 张 平, 魏建平, 等. CT 可视化的受载煤体三维裂隙结构动态演化试验研究[J]. 煤炭学报, 2019(增刊 2): 574 – 584. (WANG Deng-ke, ZHANG Ping, WEI Jian-ping, et al. Research on dynamic evolution of 3D fracture structure of loaded coal body based on CT visualization[J]. Journal of China Coal Society, 2019(S2): 574 – 584. (in Chinese))
- [8] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 煤岩三轴细观损伤演化规律的 CT 动态试验[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, **18**(5): 497 – 502. (GE Xiu-run, REN Jian-xi, PU Yi-bin, et al. A real-in-time CT triaxial testing study of meso-damage evolution law of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, **18**(5): 497 – 502. (in Chinese))
- [9] 陈正汉, 卢再华, 蒲毅彬. 非饱和土三轴仪的 CT 机配套及其应用[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(4): 387 – 392. (CHEN Zheng-han, LU Zai-hua, PU Yi-bin. The matching of computerized tomography with triaxial test apparatus for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(4): 387 – 392. (in Chinese))
- [10] 李小春, 曾志姣, 石 露, 等. 岩石微焦 CT 扫描的三轴仪及其初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(6): 1128 – 1134. (LI Xiao-chun, ZENG Zhi-jiao, SHI Lu, et al. Triaxial apparatus for micro-focus CT scan of rock and its preliminary application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(6): 1128 – 1134. (in Chinese))
- [11] 庞旭卿, 胡再强, 李宏儒, 等. 黄土剪切损伤演化及其力学特性的 CT-三轴试验研究[J]. 水利学报, 2016, **47**(2): 180 – 188. (PANG Xu-qing, HU Zai-qiang, LI Hong-ru, et al. Structure damage evolution and mechanical properties of loess by CT-triaxial test[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, **47**(2): 180 – 188. (in Chinese))
- [12] 曹剑秋, 张 巍, 肖 瑞, 等. 南京粉砂三轴压缩过程中的三维孔隙结构演化特征[J]. 地球科学与环境学报, 2018, **40**(4): 487 – 496. (CAO Jian-qiu, ZHANG Wei, XIAO Rui, et al. Characteristics of 3D pore structure evolution of Nanjing silty sand during the triaxial compression[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, **40**(4): 487 – 496. (in Chinese))
- [13] 程 壮, 王剑锋. 用于颗粒土微观力学行为试验的微型三轴试验仪[J]. 岩土力学, 2018, **39**(3): 1123 – 1129. (CHENG Zhuang, WANG Jian-feng. A mini-triaxial apparatus for testing of micro-scale mechanical behavior of granular soils[J]. Rock and Soil Mechanics. 2018, **39**(3): 1123 – 1129. (in Chinese))
- [14] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (in Chinese))

(编校: 孙振远)